第42卷 第2期
2025年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 2
Feb. 2025

基于相似误差订正方法的宁夏冬季气温模式产品解释应用

王 岱[1,2]， 马 阳[1,2]， 张 雯[1,2]， 李 欣[1,2]， 黄 莹[1,2]， 王素艳[1,2]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；
2. 宁夏回族自治区气候中心，宁夏 银川 750002）

摘 要：冬季月和季节内频繁交替的冷暖事件增大了短期气候预测的难度和挑战性，加之气候动力模式对于宁夏冬季气温的预测水平整体不高，导致预测质量不稳定。动力与统计相结合的模式解释应用方法的发展，为预测质量的提升提供了有效的技术手段，也是省级短期气候预测业务亟须发展的重要方向。基于国家气候中心MODES二代产品的EC模式近30 a历史回算数据、宁夏19个国家气象站冬季逐月平均气温观测数据、NCEP/NCAR大气再分析资料等，采用相似误差订正方法，利用同期环流关键区信息对宁夏冬季月气温开展模式解释应用，旨在提高宁夏气候趋势预测准确率和客观化水平。结果表明：EC模式原始预测结果对宁夏冬季各月气温的预测技巧整体较高，尤其对于趋势和异常量级的把握能力较好；采用相似误差订正方案后，仍能有效提高EC模式对宁夏冬季气温的预测技巧，其中12月和1月预测技巧提高尤为明显，订正后PS、PC评分分别高于70%和64%。当1月平均气温为正距平、12月和2月为负距平时预测技巧提高更明显，气温偏低幅度越大提高越显著；模式误差大小对预报订正的效果无明显影响，即使在模式误差绝对值较大情况下，该订正方案仍能不同程度地提升冬季各月模式气温预测技巧。因此，相似误差订正方法可以在模式误差较大的情况下，进一步提高宁夏冬季气温趋势和异常量级的预报准确性，改进模式预报技巧的稳定性，在实际业务中具有良好的应用价值。

关键词：宁夏；冬季气温；相似误差订正方法；模式产品；解释应用

短期气候预测涉及气候系统中多因子在多时间尺度上复杂的相互作用[1]，一直是一个世界性难题。在气候变暖背景下，宁夏冬季气温异常事件多样、频发，随之而生的新特点显著突出，一方面冬季气温呈明显上升趋势，极端最低/最高气温屡创新高；另一方面，季节内气温变幅大、阶段性低温频繁，气温异常偏低的幅度多大于异常偏高的幅度[2]。以2023年/2024年冬季为例，极端冷、暖事件频发，季节内经历了6次冷暖交替，12月上旬宁夏全区平均气温为1961年以来同期第2高值，中旬气温转为1986年以来同期第4低值；1月上中旬气温骤升，全区平均气温再次升至有气象记录以来同期第2高值，下旬受寒潮天气过程影响，多地气温较常年同期偏低3 ℃以上；2月上中旬一半以上国家气象站极端最高气温为1961年以来2月上中旬第1~3高值，下旬全区平均气温降为1961年以来同期第4低值。月和季节内频繁交替的冷暖事件增大了短期气候预测的不确定性，加之2021年气候业务更新了气候平均值（由1981—2010年调整为1991—2020年），气温基准态升高后，气温趋势异常量级的预测难度也随之提升，冬季气温趋势预测迎来了新的挑战。

国内外气候动力模式的快速发展和应用，为开展客观定量的气候预测提供了有效而可靠的技术基础。短期气候预测通常依赖于动力和统计两种方法，将二者的优点加以结合来提高预测水平是目前普遍的认知，也是提高气候预测水平的重要途径[3-4]。早在20 a前，一种基于动力相似预报策略的相似误差

收稿日期：2024-07-15； **修订日期：**2024-11-18
基金项目：宁夏智能数字预报技术研究与应用科技创新团队（2024CXTD006）；中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究项目（CAMF-202202）；第七批宁夏回族自治区青年科技人才托举工程；宁夏自然科学基金项目（2023AAC03792）
作者简介：王岱（1990-），女，工程师，主要从事气候变化及短期气候预测研究. E-mail: wangd123@126.com
通讯作者：张雯. E-mail: acaimeme@sina.cn

订正方法就被提出，旨在将大量历史相似性信息有效运用到现有复杂的数值模式中来实现动力模式与统计方法的结合[5-7]，而后该思路和方法在科研和业务中得到进一步改进和发展，并应用在不同时间尺度的环流和降水预测中，取得较好的预报订正效果[4,8-10]。以往研究表明，大气环流对冬季气温有很好的预测指示意义[1,11-14]，利用环流场与要素场历史序列建立两者之间显著的统计关系，再提取模式输出的预测技巧较高的环流场信息得到要素场的预报，往往较模式直接输出的预测结果具有更高的准确率[9,15]。在此基础上，利用不同模式结果进行集成预测，以减少模式和解释应用方法本身的不确定性[16-17]。

气候动力模式对于宁夏冬季气温的预测水平整体不高，预测质量不稳定，在目前宁夏省级气候预测业务中，有效利用动力模式产品并结合统计手段开展宁夏月季尺度气温模式解释应用的研究仍较少，而这正是省级短期气候预测业务亟须发展的重要方向。宁夏冬季气温与季风活动、中高纬冷空气等环流系统关系密切[18-20]，怎么充分挖掘模式的关键环流信息，选择合适的模式解释应用方法，提高宁夏气温预测质量是我们重点关注的方面。考虑到相似误差订正方法能根据与宁夏冬季气温有显著相关关系的环流影响因子，有针对性地制定相似选取指标和预报方案，且计算相对简单、运算高效、便于应用，因此，本文选择该方法并结合气候模式产品对宁夏冬季逐月气温进行解释应用，旨在发展宁夏短期气候预测关键技术，提高预测客观化水平和预测准确率，在地方经济和社会发展中更好地发挥气象防灾减灾作用。

1　资料与方法

1.1　数据资料

气温观测资料来源于宁夏19个国家气象站1991—2024年月平均数据。

大气环流资料为美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心（NCEP/NCAR）第一版本1991—2024年月平均再分析数据，水平分辨率为2.5°×2.5°。相比于其他变量而言，该数据对于温度场的可信度更高，且对1970年代之后的环流场也具有不错的刻画[21]，因此，选择该数据作为环流实况数据。

模式资料来自国家气候中心多模式气候预测产品解释应用集成系统（MODES）数据集中升级后（MODESv21_ecmwf_seas51版本）的欧洲中期天气预报中心（ECMWF）模式预测产品（EC模式），空间分辨率为1.0°×1.0°。该数据经检验评估和在宁夏业务应用其预测技巧在同类预测产品中表现良好，且历史回算序列完整无缺测。因此，本文选取1993—2024年EC模式提前1个月起报的12月、1月、2月500 hPa位势高度和平均气温数据开展模式解释应用，利用双线性插值方法将模式气温数据插值到宁夏19个国家气象站点。

1.2　方法

本文利用相似误差订正方法对EC模式预报的宁夏冬季气温进行解释应用，该方法在执行过程中需要扰动订正法、相似离度法以及样本交叉检验法等作为辅助手段去执行相似误差订正方案，具体计算方法如下。

1.2.1　*扰动订正法*　考虑到模式本身存在的系统误差以及缺少1991年、1992年历史回算数据，采用扰动法[22]对模式预测结果进行预处理。扰动法公式如下：

$$T_{(i)} = T_{P(i)} - \overline{T}_{P(i)} + \overline{T}_{o(i)} - \overline{T}_{oc(i)} \tag{1}$$

式中：i为预测月；$T_{P(i)}$为模式原始预测气温；$\overline{T}_{P(i)}$为模式原始预测1993—2020年均值；$\overline{T}_{o(i)}$为观测的1993—2020年均值；$\overline{T}_{oc(i)}$为观测的气候值（1991—2020年）；$T_{(i)}$为扰动法处理后的气温距平，作为本文中模式原始预测结果。

1.2.2　*相似离度法*　本文采用相似离度法[23]识别环流相似年，该方法能弥补相似系数和各种距离法的不足，反映出环流系统的“形”和“值”的差距，已知在环流场中“形”能反映环流系统的位置和范围，“值”能反映其强度，二者共同影响预报要素的异常程度，在天气预报和气候预测等方面得到较多应用[24-26]，是一种比较客观的相似识别方法。以h_i和h_j分别表示两个场，h_{ik}和h_{jk}分别表示h_i和h_j场中的第k个格点上的数值，$h_{ij}(k)$表示第k个格点上两个场的差值，则两个场间的相似离度（C_{ij}）表达式为：

$$C_{ij} = \frac{S_{ij} + D_{ij}}{2} \tag{2}$$

其中：
$$S_{ij}=\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}\left|h_{ij}(k)-e_{ij}\right| \tag{3}$$
$$D_{ij}=\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}\left|h_{ij}(k)\right| \tag{4}$$
$$h_{ij}(k)=h_{ik}-h_{jk} \tag{5}$$
$$e_{ij}=\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}h_{ij}(k) \tag{6}$$

式中：M表示场中有M个数值；e_{ij}表示h_i和h_j场之间差值之和的平均值；D_{ij}表示值系数，为两个场之间的差值绝对值之和的平均值，它反映两个场之间在总平均数值上的差异程度。S_{ij}表示形系数，反映两个场之间的差值的离散程度，其值越小，则两场形状越相似，表征了环流场之间的形相似程度。一般情况下，均默认两样本间的相似离度即为值系数和形系数的平均值。

1.2.3 检验评估方法

（1）样本检验方法

对预测订正结果采用样本交叉检验的方法[27]，假设有n年的样本，首先选出1年作为独立预测样本，用其余n-1年样本进行相似误差订正方案，得到对前面选出的1年独立预测样本的订正预测结果，这个过程重复n次，直到n年样本都被选择，最后得到n年样本相应的预测订正结果，然后根据观测数据计算n年预测订正结果的检验评分，这种方法的优点在于可以充分利用到所有的样本数据。本文中模式回算数据样本年限不长（n=31），选择该方法使结果更具统计意义，同时也与文中选择环流关键区时采用相关计算的年限保持一致。

（2）评分方法

本文采用业务中常用的趋势异常综合（PS）、距平符号一致率（PC）和距平相关系数（ACC）评分对模式预测结果进行检验评估[28]。这3种评分方法从不同方面反映预报产品的预测性能，即PS评分反映预报对实况异常量级的把握能力，PC评分反映预报与实况距平符号一致的程度，ACC主要体现预报与实况空间分布型的符合程度[15,29]。

1.2.4 相似误差订正方案 相似误差订正方法假定相似样本具有相似的预报误差，进而利用若干相似样本对应的预报误差估计当前预报误差，再利用相似样本的预报误差的集合平均叠加到当前预报结果上[30]。对于本文来说，相似误差订正步骤具体如下：

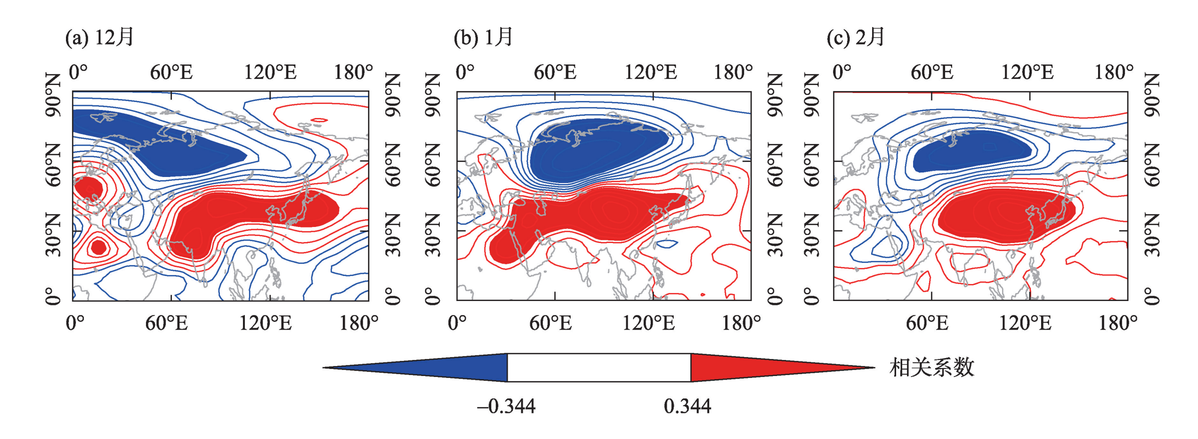
（1）基于1993/1994—2023/2024年冬季（12月—次年2月）EC模式月气温历史回报场数据（T）和站点气温观测场数据（T_0），建立该模式对宁夏逐月气温距平预测的误差场（$\Delta T=T-T_0$），区域平均后建立误差序列（$I_{\Delta T}$）；将区域平均的气温距平观测数据序列（I_{T_0}）分别与500 hPa位势高度场求相关，得到冬季逐月气温的高相关环流影响区，以区域平均后的位势高度计算逐月关键区环流指标（$I_{500\,\mathrm{H}}$）；计算$I_{\Delta T}$和$I_{500\,\mathrm{H}}$的相关性，高相关环流关键区可作为影响模式气温误差的关键因子，即该区域可作为历史相似误差信息选取的关键影响区域。

（2）利用相似离度方法选取与当前预测月500 hPa环流关键区最相似的历史实况年份，并提取这些相似年份的模式气温预测的误差场（$\overline{\Delta T}$）并合成，将其叠加到当前预测月的气温场（T'）上，得到相似误差订正后的气温预测结果，并计算订正前后预测结果的检验评分。

2 结果与分析

2.1 确定影响模式误差的环流关键区

利用1993/1994—2023/2024年冬季逐月I_{T_0}序列与同期500 hPa位势高度距平场求相关，找出影响各月气温异常的中高纬关键环流分布型。如图1所示，12月、1月和2月欧亚大陆500 hPa位势高度场整体均为南北反位相模态，尽管逐月正、负位势高度异常区域略有差别，但总体特征表现为当乌拉尔山及其附近为负位势高度异常，我国北方上空为大范围正位势高度异常时，这种环流配置不利于冷空气南下，因此，有利于宁夏冬季各月气温偏高，反之则为偏低。将图1中通过95%置信水平检验的区域（表1关键区范围）500 hPa位势高度场进行区域平均，用相关系数为正的区域平均序列减去相关系数为负的区域平均序列，得到新的序列，再将新序列进行标准化，将其定义为500 hPa关键区环流指标（$I_{500\,\mathrm{H}}$）。另外，将1993/1994—2023/2024年冬季逐月模式气温距平预测结果减去实况气温距平，得到各月气温距平误差场（ΔT），并进行区域平均，得到误差场区域平均序列（$I_{\Delta T}$）。如表1所示，12月、1月、2月$I_{\Delta T}$与$I_{500\,\mathrm{H}}$相关性好，均通过99.9%置信水平检验，因此，说明利用上述环流关键区作为历史相似误差信息选取的关键影响区域是合理的。



注:等值线代表相关系数,填色区域代表通过95%置信水平检验。

图1　1993/1994—2023/2024年冬季各月 I_{T_0} 与500 hPa位势高度距平场的相关系数分布

Fig. 1　Distribution of correlation coefficients between monthly regional average error series and 500 hPa geopotential height anomaly field in winter from 1993/1994 to 2023/2024

表1　500 hPa位势高度场关键区范围及其与模式误差的相关系数

Tab. 1　Key region range of 500 hPa potential height field and its correlation coefficient with mode error

	12月	1月	2月
关键区范围	0°~160°E	15°~125°E	47°~150°E
	20°~80°N	12°~75°N	22°~75°N
$I_{500\mathrm{H}}$ 与 $I_{\Delta T}$ 相关系数	–0.63	–0.68	–0.69

2.2　冬季月气温相似误差订正

2.2.1　订正前后预测效果检验评估　为量化订正方案的提高技巧,图2的箱线图展示了模式原始和相似误差订正后的预测技巧在这31 a中各段位的评分值,从PS评分上看(图2a),12月、1月、2月EC模式原始预测PS评分均值分别为60%、67%、60%,模式对于异常量级的把握能力整体较高,订正后12月、1月PS评分的均值分别提高12%和3%,订正后均超过70%;25%分位值提高21%、17%,订正后分别超过50%和60%,50%分位值分别提高12%、15%,订正后均超过85%;2月PS评分提高不明显,即采用相似误差订正后,尤其12月和1月气温异常幅度与实况更为接近。对于PC评分来说(图2b),12月、1月、2月原始预测PC评分均值分别为54%、63%、57%,其中模式对于1月趋势的预测技巧相对较高,订正后12月、1月均值分别提高11%和1%,订正后均超过64%;25%分位值均提高16%,订正后均超过30%,50%分位值分别提高16%、10%,订正后均超过75%;2月PC评分提高不显著,即经过订正后,12月和1月的气温趋势与实况更为接近。对于ACC评分来说(图2c),12月、1月、2月原始预测ACC评分均值分别为0.09、0.03、0.05,订正后12月ACC评分的均值、不同分位值、最大值提高0.05~0.1;1月均值、不同分位值、最小值、最大值提高0.1~0.2;2月提

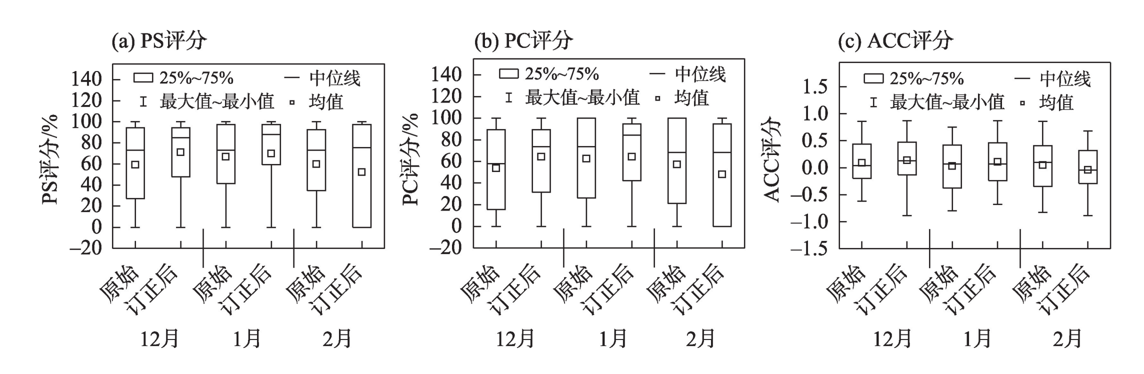


图2　1993/1994—2023/2024年超前1个月起报的冬季逐月模式原始预测和相似误差订正后结果的PS、PC和ACC预测技巧评分箱线图

Fig. 2　Box plots of PS, PC and ACC prediction skills scores for starting one month ahead of monthly models in winter with original predictions and similar error corrections reported from 1993/1994 to 2023/2024

高不明显，即经过订正后，12月和1月模式对于空间分布的把握能力均有不同程度的提高，但整体订正效果不明显。

综合来看，EC模式对于冬季各月原始预测效果良好，实施相似误差订正方案后使得12月和1月模式预测技巧评分整体高于订正前，订正效果较好，2月则提高不明显，其原因主要与模式本身2月环流关键区预测技巧偏低有关，即环流关键区与气温总体以负相关为主。从3类评分技巧上来看，各月中PS评分衡量的订正技巧相对提高最明显，其次为PC评分，ACC最差，说明相似误差订正对于气温趋势及异常级的提高技巧更明显，但对气温空间分布的刻画能力相对较弱；无论订正与否，模式预测的气温ACC评分始终不高，这与前人的研究结果类似，即对于EC模式提前1个月起报的西北地区（如新疆）月气温预测结果，冬季月平均ACC评分未超过0.1[31]；另外，可能也与模式原始空间分辨率较低有关，对于宁夏这种区域面积较小的地区而言，模式很难反映预测要素的空间差异。

为进一步说明该方案在冬季各月平均气温异常及模式偏差背景下对模式预测技巧的改进效果，以PS评分为例（PC和ACC类似，图略），将订正后的模式PS评分减去模式原始评分，得到订正方案的PS评分提高值（ΔPS），并给出提高值分别与I_{T_0}（图3）及$I_{\Delta T}$（图4）的关系。此外，需要说明的是由图2可知模式原始的预测技巧较高，若该订正方案的ΔPS为0，也说明该订正方案有正订正技巧。由图3a分析得到，订正方案对于总样本量68%的模式12月PS评分预测技巧有改善，当ΔPS >0时预测技巧的提升存在温度不对称性，当I_{T_0} >0时，越接近0 ℃，订正效果越好，当I_{T_0} <0时，越偏离0 ℃，订正效果越好，但整体来说，当I_{T_0}以负为主时，订正技巧提升明显；对1月来说，订正方案对于总样本量68%的模式PS评分预测技巧有改善，预测技巧的提升存在温度的对称性，当I_{T_0}无论为正还是为负，基本越偏离0 ℃，订正效果越好，但总体上当I_{T_0} >0时，订正技巧提高明显（图3b）；对2月来说，订正方案对于总样本量65%的模式PS评分预测技巧有改善，在这些年份中，I_{T_0}基本为负（图3c）。综上所述，12月和2月I_{T_0}为负时预测技巧提高更明显，且大部为I_{T_0}越偏离0 ℃则预测技巧提高越显著，1月I_{T_0}为正时提高技巧更明显。

冬季各月$I_{\Delta T}$与ΔPS的关系表明，12月ΔPS存在$I_{\Delta T}$的对称性，当$I_{\Delta T}$无论为正还是为负，基本越偏离0 ℃，订正效果越好，但总体上当$I_{\Delta T}$ >0时，订正技巧提高更明显（图4a）；1月ΔPS基本也存在$I_{\Delta T}$的对称性，当$I_{\Delta T}$无论为正还是为负，总体越偏离0 ℃，订正效果越好，当$I_{\Delta T}$ >0时，PS评分提高幅度最大不超过40%，当$I_{\Delta T}$ <0时，订正技巧提升更明显，最高提升100%（图4b）；2月订正技巧提升基本在$I_{\Delta T}$ >0时（图4c）。总体来说，$I_{\Delta T}$的正负及大小对预测技巧的提升影响不大，各月模式误差绝对值即便较大，但该方案仍然能够对模式预测结果进行有效订正。

2.2.2 典型相似年个例选取 采用交叉检验方法对冬季各月订正前后的预测效果进行检验评估对比，选取合适数量的相似年份对提高订正技巧起到很好的促进作用，如果选取的年份数太少不能涵盖模式误差所贡献的订正信息，选取太多，相似离度越往后越大，相似性下降，对订正反而起到负贡献。经验证，冬季各月取相似离度最小的前3~5 a作为相似年的订正效果最好（PS、PC和ACC评分整体提

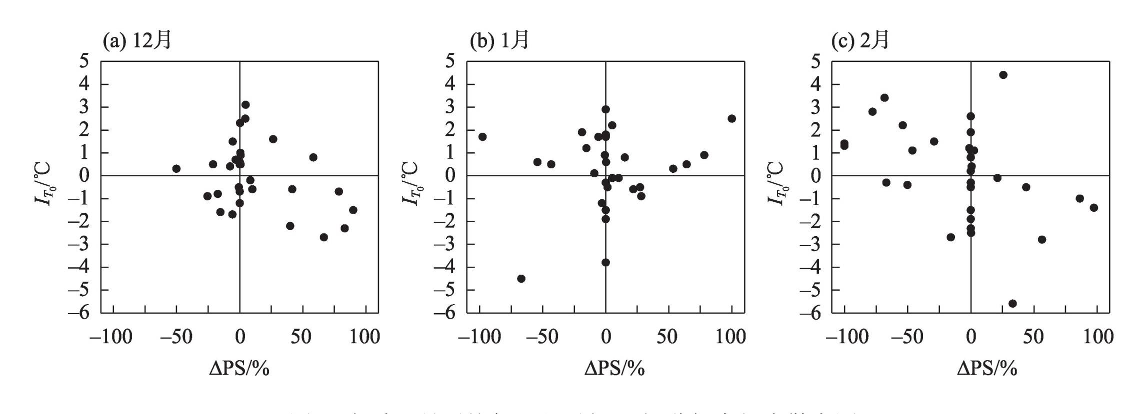


图3 冬季逐月平均气温距平与PS评分提高幅度散点图

Fig. 3 Scatter plot of monthly average temperature anomaly and PS score improvement in winter

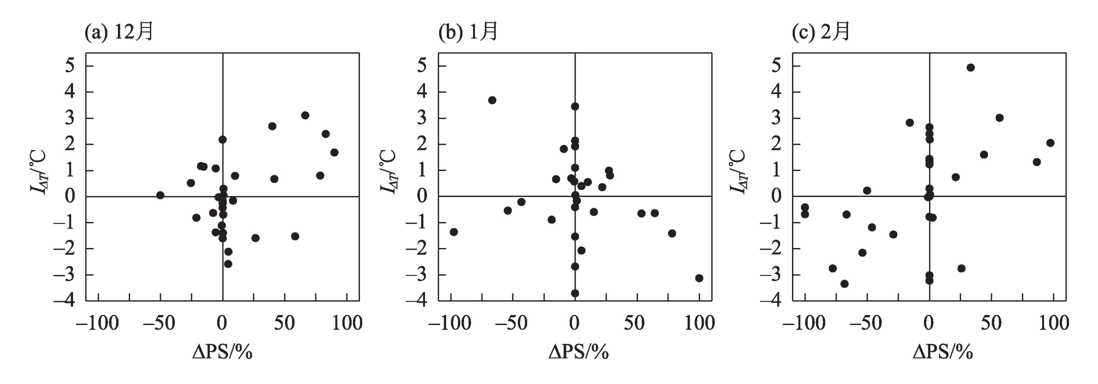


图4　冬季逐月平均气温模式误差与PS评分提高幅度散点图

Fig. 4　Scatter plot of monthly average temperature model error and PS score improvement in winter

高幅度最大,图略)。下面以2019年12月为例说明订正方案的步骤及其合理性。2019年12月,宁夏全区平均气温异常偏高,大部分地区偏高1 ℃以上。图5为与模式超前1个月起报的2019年12月500 hPa位势高度距平场关键区(图1a中通过95%置信水平检验的区域)最相似的历史前5 a实况(即相似离度最小的5 a),可以看出,2019年12月模式预测的环流关键区位势高度距平为"北低南高"分布(图5a),有利于宁夏气温整体偏高。选取的前5相似年(1994年、2000年、2023年、2021年和2004年)关键区环流分布型基本也为典型的"北低南高"分布型(图5b~图5f),与模式预测的2019年具有较高相似度,再次说明采用相似离度方法选取环流相似年的合理性较高。表2给出上述历史相似年的模式误差,误差值在−2.59~−0.05之间,即模式气温预测值均低于实况,当相似年气温实际偏高时,模式容易出现气温偏低的预测结果。执行订正方案后,在预测的2019年12月气温距平(T')的基础上叠加前5相似年模式误差的平均值($\overline{\Delta T}$), $\overline{\Delta T}$ <0, $T'-\overline{\Delta T}$ 值为正,相当于在预测的基础上,叠加了模式偏低的程度。

模式预测的2019年12月环流场关键区指示宁夏气温以偏高为主,模式预测的12月气温距平则呈"北高南低"分布特征(图6a);经订正方案得到预测平均气温距平为全区一致偏高(图6b),在趋势和异常量级两个方面均与实况更为接近(图6c)。订正

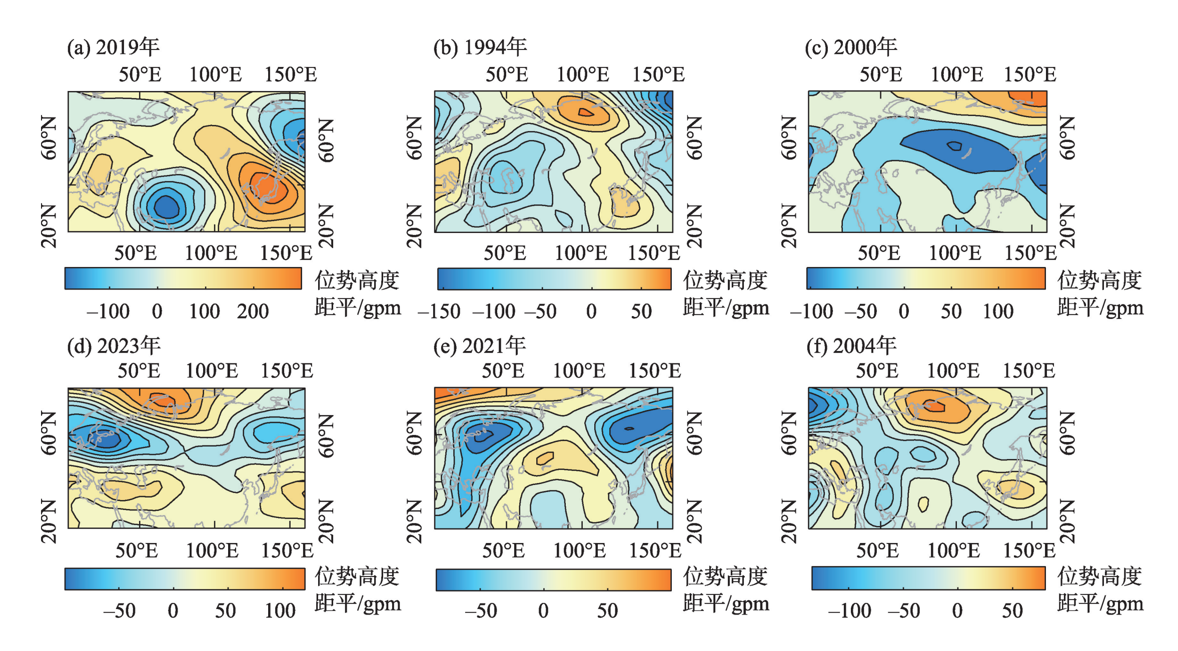


图5　2019年12月EC模式预测的500 hPa位势高度距平场关键区(a)及其历史相似年实况距平场分布(b~f)(等值线和填色区域,单位:gpm)

Fig. 5　The 500 hPa geopotential height anomaly predicted by the EC model in December 2019 (a) and its historical similarity year in reality (b-f)(contours and filled region, the unit is gpm)

表2 个例年(2019年12月)及其相似年平均气温距平的模式误差

Tab. 2 Model errors of average temperature anomalies in individual (December 2019) and its similar years

	个例年	相似年				
	2019年	1994年	2000年	2023年	2021年	2004年
误差区域平均($\overline{\Delta T}$)	−1.59	−1.61	−2.59	−0.30	−0.05	−1.38

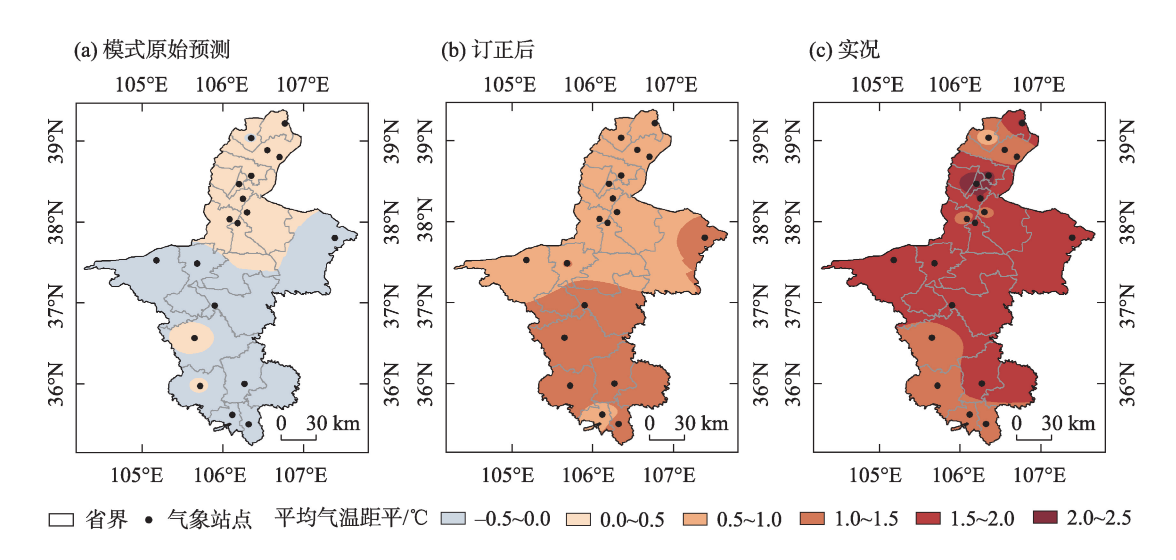


图6 2019年12月模式原始预测(a)、订正后(b)、实况(c)平均气温距平分布

Fig. 6 The distribution of average temperature anomalies in the model original prediction (b), revised (c) and actual situation (a) of the December 2019

表3 2019年12月模式原始预测和订正后平均气温距平的PS、PC和ACC预测技巧评分

Tab. 3 PS, PC and ACC prediction skill scores of average temperature anomaly in December 2019 for the model original and corrected

	PS评分/%	PC评分/%	ACC评分
模式原始预测	73	58	0.22
订正后	100	100	0.09

后2019年12月气温PS、PC评分均为100%,分别较原始预测场提高27%、42%;ACC评分有所下降(表3),但基于相似误差方法的订正效果整体良好。通过近3 a的业务试用,该订正方案使得冬季各月气温预测准确率有不同程度的提高,可以明显提升宁夏冬季气温趋势的客观化预测技巧。

3 结论与讨论

随着国家气候中心对月季动力模式的不断优化和更新,针对MODES产品升级后的EC模式回报检验和解释应用工作也急需开展。本文针对EC模式冬季各月平均气温预测中存在的偏差,利用近30 a模式历史回算数据和历史观测资料进行相似误差订正,并对订正效果进行检验评估,得出如下主要结论:

(1) EC模式对宁夏冬季各月原始预测的气温PS、PC评分均值分别为62%、58%,预测技巧整体较高,尤其对于气温趋势和异常量级的把握能力较好。采用环流相似信息执行相似误差订正方案后,仍能有效提高EC模式的气温预测技巧,12月、1月预测技巧提高尤为明显,其中PS评分分别提高12%、3%,订正后均超过70%,PC评分分别提高11%、1%,订正后均高于64%,更好地预测了宁夏冬季气温趋势及异常量级。但对2月预测技巧提升不明显,其原因主要与EC模式对2月环流关键区的原始预测技巧偏低有关。且无论订正与否,模式预测的气温ACC评分始终不高,EC模式很难反映宁夏冬季气温的空间差异。

(2) 订正效果分别与气温距平、模式误差的关系表明,12月和2月平均气温为负距平时预测技巧提高更明显,具有气温偏低幅度越大提高越显著的特点,而1月平均气温为正距平时预测技巧提高更明显。另外,模式误差大小对预测订正的效果无明

显影响,即便模式误差绝对值较大,但该订正方案仍然能够在不同程度上提升冬季各月模式气温预测技巧。

在省级气候业务的发展需求下,本文基于相似误差订正方法开展了宁夏冬季气温趋势预测的模式解释应用,该方法通过模式与实况的差值订正预测结果,即能较大程度地弱化模式本身误差所带来的局限性,具有一定普适参考价值。该方法的优势在于,与统计预报相比多了气候模式的贡献,与系统性误差订正方法相比多了历史相似信息的贡献[4];除了适用于宁夏地区,具有提高西北地区气温预报技巧的潜力外,该方法还能显著提高亚洲区域、中国的降水和环流预报技巧,比系统误差订正预报有明显改善[4,7,32]。但该方法的局限性在于受模式性能和历史回算数据长短的影响,在模式产品的选择及关键环流区的确定上存在一定的限制。后续将更新高分辨率模式产品并考虑引入多模式成员改善预测效果,且考虑发展多模式集成的动力-统计降尺度预测订正技术[33-35],进一步提升宁夏冬季气温预测质量。

参考文献(References):

[1] 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655. [Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Gao Hui, et al. Advances of the short-range climate prediction in China[J]. Journal of Applied Meteorogical Science, 2013, 24(6): 641-655.]

[2] 杨兴国. 宁夏气候与生态环境[M]. 北京: 气象出版社, 2021: 22-23. [Yang Xingguo. Ningxia Climate and Ecological Environment [M]. Beijing: Meteorological Press, 2021: 22-23.]

[3] Goddard L, Mason S J, Zebiak S E, et al. Current approaches to seasonal-to-inter annual climate predictions[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(9): 1111-1152.

[4] 郑志海, 任宏利, 黄建平. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7359-7367. [Zheng Zhihai, Ren Hongli, Huang Jianping. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7359-7367.]

[5] 任宏利, 丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 988-993. [Ren Hongli, Chou Jifan. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63 (6): 988-993.]

[6] Gao L, Ren H L, Li J P, et al. Analogue correction method of errors and its application to numerical weather prediction[J]. Chinese Physics, 2006, 15(4): 882-889.

[7] 任宏利, 丑纪范. 动力相似预报的策略和方法研究[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(8): 1101-1109. [Ren Hongli, Chou Jifan. Research on strategies and methods for dynamic similarity forecasting[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2007, 37(8): 1101-1109.]

[8] 李芳, 林中达, 左瑞亭, 等. 基于经验正交函数和奇异值分解对东亚季风区跨季度夏季降水距平的订正方法[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 658-668. [Li Fang, Lin Zhongda, Zuo Ruiting, et al. The methods for correcting the summer precipitation anomaly predicted extraseasonal over East Asian Monson Region based on EOF and SVD[J]. Climatic and Environmental Reasearch, 2005, 10(3): 658-668.]

[9] 谭桂容, 段浩, 任宏利. 中高纬度地区500 hPa高度场动力预测统计订正[J]. 应用气象学报, 2012, 23(3): 304-311. [Tan Guirong, Duan Hao, Ren Hongli. Statistical correction for dynamical prediction of 500 hPa height field in mid-high latitudes[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(3): 304-311.]

[10] 程娅蓓, 任宏利, 谭桂容. 东亚夏季风模式跨季预测的EOF-相似误差订正[J]. 应用气象学报, 2016, 27(3): 285-292. [Cheng Yapei, Ren Hongli, Tan Guirong. Empirical orthogonal function-analogue correction of extra- seasonal dynamical prediction of East-Asian summer monsoon[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(3): 285-292.]

[11] 谭桂容, 王腾飞. 2011/2012年冬季中国气温异常的成因及前兆信号[J]. 大气科学学报, 2014, 37(1): 65-74. [Tan Guirong, Wang Tengfei. Causes and precursors of the winter temperature anomaly in China in 2011/2012[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(1): 65-74.]

[12] 申红艳, 温婷婷, 封国林, 等. 中国冬季气温季节内变率特征及环流分析[J]. 气象, 2021, 47(3): 327-336. [Shen Hongyan, Wen Tingting, Feng Guolin, et al. Characteristics and circulation analysis of intraseasonal variability of winter temperature in China[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(3): 327-336.]

[13] 谭桂容, 张文正. 中国冬季地面气温10~30 d低频变化及其与乌拉尔山环流的关系[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 502-512. [Tan Guirong, Zhang Wenzheng. The 10-30 d low-frequency variation of winter surface air temperature in China and its relationship with Ural Mountain circulation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(4): 502-512.]

[14] 陈颖, 李维京, 史红政, 等. 北大西洋涛动对新疆冬季极端冷事件的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 348-355. [Chen Ying, Li Weijing, Shi Hongzheng, et al. Effects of NAO on the extreme cold events in Xinjiang in winter[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 348-355.]

[15] 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 656-665. [Feng Guolin, Zhao Junhu, Zhi Rong, et al. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method[J]. Journal of Applied Meteorological

Science, 2013, 24(6): 656-665.]

[16] 程智, 段春锋, 邓淑梅. 多模式集合优选方案在淮河流域夏季降水预测中的应用[J]. 热带气象学报, 2017, 33(2): 241-249. [Cheng Zhi, Duan Chunfeng, Deng Shumei. Application of optimization scheme of multi-model ensemble in prediction of the Huaihe River Basin summer precipitation[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(2): 241-249.]

[17] 姚愚, 晏红明. 多模式解释集成方法在云南降水预测中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 926-935. [Yao Yu, Yan Hongming. Application of multi-mode interpretation and integration methods in precipitation prediction in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(5): 926-935.]

[18] 王素艳, 李欣, 郑广芬, 等. 21世纪以来宁夏冬季气温异常及500 hPa环流特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 569-575. [Wang Suyan, Li Xin, Zheng Guangfen, et al. Temperature anomaly in winter in Ningxia after 2000 and the 500 hPa circulation feature [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4): 569-575.]

[19] 王璠, 王素艳, 郑广芬, 等. 2016年宁夏冬季气温异常及其成因分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 22-31. [Wang Fan, Wang Suyan, Zheng Guangfen, et al. Analysis of temperature anomaly in winter of 2016 in Ningxia and its causes[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1): 22-31.]

[20] 黄莹, 王素艳, 马阳, 等. 宁夏近60 a寒潮变化特征及其环流异常[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1718-1728. [Huang Ying, Wang Suyan, Ma Yang, et al. Change characteristics and circulation anomaly analysis of cold wave in Ningxia over the past 60 years[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(11): 1718-1728.]

[21] 赵天保, 符淙斌. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 634-648. [Zhao Tianbao, Fu Congbin. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upperair observations over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(3): 634- 648.]

[22] 杨绚, 李栋梁, 汤绪. 基于CMIP5多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 795-804. [Yang Xun, Li Dongliang, Tang Xu. Probability assessment of temperature and precipitation over China by CMIP5 multi-model ensemble[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 795-804.]

[23] 李开乐. 相似离度及其使用技术[J]. 气象学报, 1986, 44(2): 174-183. [Li Kaile. A new similarity parameter and its application [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1986, 44(2): 174-183.]

[24] 张立祥, 陈力强, 刘文明, 等. 东北区夏季月降水数值产品释用预报方法[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 348-354. [Zhang Lixiang, Chen Liqiang, Liu Wenming, et al. Application of the numerical products of T63L16 Model for predicting monthly precipitation on summer over Northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2000, 11(3): 348-354.]

[25] 何慧, 金龙, 覃志年, 等. 动力延伸预报产品在广西月降水预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 727-731. [He Hui, Jing Long, Qin Zhinian, et al. Application of dynamic extended forecast products to monthly precipitation forecast in Guangxi[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5): 727-731.]

[26] 李博, 赵思雄, 陆汉城, 等. 综合多级相似预报技术在暴雨短期预报中的检验[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 307-314. [Li Bo, Zhao Sixiong, Lu Hancheng, et al. Test of the synthetical multilevel analog forecast technology in short-term rainstorm prediction[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(3): 307- 314.]

[27] Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1987, 26(11): 1589-1600.

[28] 陈桂英, 赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估[J]. 应用气象学报, 1998, 9(2): 178- 185. [Chen Guiying, Zhao Zhenguo. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(2): 178-185.]

[29] 何慧根, 李巧萍, 吴统文, 等. 月动力延伸预测模式业务系统DERF 2.0对中国气温和降水的预测性能评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 950-964. [He Huigen, Li Qiaoping, Wu Tongwen, et al. Temperature and precipitation evaluation of monthly dynamic extended range forecast operational system DERF 2.0 in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 950-964.]

[30] Ren Hongli, Chou Jifan, Huang Jianping, et al. Theoretical basis andapplication of an analogue-dynamical model in the Lorenz system[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(1): 67-77.

[31] 李雪洮, 段春锋, 杨智敏, 等. SEAS5模式对新疆月尺度气温和降水的预测性能评估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(5): 31-38. [Li Xuetao, Duan Chunfeng, Yang Zhimin, et al. Monthly temperature and precipitation evaluation of SEAS5 in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(5): 31-38.]

[32] 龚志强, 赵俊虎, 封国林, 等. 基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 236-252. [Gong Zhiqiang, Zhao Junhu, Feng Guolin, et al. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia [J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(2): 236-252.]

[33] Maraun D, Widmann M. Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017: 25-28.

[34] Fang Y H, Chen H S, Gong Z Q, et al. Multi-scheme corrected dynamic- analogue prediction of summer precipitation in northeastern China based on BCC_CSM[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(6): 1085-1095.

[35] Liu Y, Fan K, Chen L J, et al. An operational statistical downscaling prediction model of the winter monthly temperature over China based on a multi- model ensemble[J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105262.

Model explanation and application of winter temperature in Ningxia based on the similarity error correction method

WANG Dai[1,2], MA Yang[1,2], ZHANG Wen[1,2], LI Xin[1,2], HUANG Ying[1,2], WANG Suyan[1,2]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China;
2. Ningxia Hui Autonomous Region Climate Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: The frequent alternation of cold and warm events in the winter months has increased the difficulty and challenge of short-term climate prediction. Additionally, the overall prediction level of the climate dynamic models for winter temperatures in Ningxia was not high, resulting in an unstable prediction quality. The development of the model interpretation application method, combining dynamics and statistics, was effective in improving the prediction quality and is crucial for the urgent development of the provincial short-term climate prediction business. This article is based on the EC model historical calculations over the past 30 years of the MODES second-generation products of the National Climate Center, the monthly average winter temperatures observation data from 19 national meteorological stations in Ningxia, and the NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data. Using the similarity error correction method, we combined the information of key circulation areas during the same period for model interpretation and application of winter temperatures to improve the accuracy and objectivity of climate trend prediction in Ningxia. The results revealed that the original prediction outcomes of the EC model have relatively high prediction skills for winter temperatures, especially regarding grasping trends and abnormal levels. After adopting a similar error correction scheme, the EC model can still effectively improve its prediction skills for winter temperatures in Ningxia, with a particularly significant improvement in December and January. After correction, the PS and PC scores were higher than 70% and 64%, respectively. Additionally, when the average temperature anomaly was positive in January and negative in December and February, the prediction skills improved more significantly; the larger the magnitude of the lower temperature, the more significant the improvement. Moreover, the magnitude of the model error did not significantly impact the forecast correction effect. Even when the absolute value of the model error was large, this correction scheme could still improve the winter monthly temperature prediction skills to varying degrees. Therefore, the similarity error correction method could further improve the forecast accuracy of the winter temperature trend and anomaly level in Ningxia under large model errors, improving the stability of the model forecast skill and providing a positive application value in practical service.

Keywords: Ningxia; winter temperature; similarity error correction method; model product; interpretation and application